

筑波大学工学システム学類における熱力学の教育改善

金川哲也

筑波大学システム情報系

1. “工学科”での熱力学教育の問題点

筑波大学理工学群工学システム学類は、機械、土木、建築、電気、情報などの工学分野を包含する、理工学部“工学科”なる表現が適切な学科である(以後“工学科”と書く)。“工学科”のうち環境開発工学専攻とエネルギー工学専攻の所属学生の必修科目である熱力学を、著者が担当している。「熱力学I」(2単位, 2年次春学期)では基礎としての熱力学の第一法則と第二法則を、「熱力学II」(1単位, 2年次秋学期)では応用事項として一般関係式、平衡条件、化学ポテンシャルをそれぞれ学ぶ。両科目は、機械工学の基幹科目である四力学(材料力学、機械力学、熱力学、流体力学)としての工業熱力学¹とは合致せず、力学と電磁気学に並ぶ基礎物理学に位置づけられる。工業熱力学の相当科目「熱工学」(1.5単位, 2年次秋学期)は他に存在する。

著者が2014年の着任から熱力学を担当するにあたり、以下のショッキングな出来事が、約4年をかけた本研究のきっかけとなった。初回に、丸1年間をかけて教えようと意気込む著者に対して、ある受講生から「私は建築士を目指しているので、熱力学がなぜ必修なのかすらわからない。建築系にも役立つ科目にしてほしい」という要望が届いたのである。当時の著者は「たしかに、建築を志向する学生は、熱力学が不要という先入観を抱いても仕方がないだろう」と直感的かつ安直に同感してしまった。振り返れば、機械工学科の出身である著者は、工業熱力学の知識に偏重しており、“工学科”で学ぶ学生の興味や思考も未だ読めない点が多い。「○○学は嫌い、苦手、難しい、興味がない」とは、学科や科目によらず、大学教育の場でよく聞くが、計3単位の必修科目を「必要がない」とは、極めて珍しい捉え方であると考え。一定数の学生が「自身には熱力学は不要」と捉える中で淡々と講義を進めたり、「将来役立つ」などと諭したとして

も、教育効果が得られるとは思えない。

では、エンジンなどの魅力溢れる機械工学への応用例を盛り込めば、意欲向上につながるだろうか。これは“工学科”では誤りであって、なぜなら、このような例示だけに力を注いでは、機械志向以外の学生の興味を削ぐと同時に「この教員は、機械志向学生以外には関心がないのではないか」という穿った目で見られかねないからである。そもそも、上述のような応用例は、あえて教員が教えなくても、学生達は常識的に知っている傾向にある。事実、例年の「熱力学I」の初回で、「熱力学は身の回りのどのような場面で使われていると思うか」と問うと、機械志向かどうかによらず、約8割の学生が「エンジン」と答える。このように“工学科”では、機械工学としての工業熱力学¹の常識、物理学としての熱力学²の常識がともに通じず、そのため教育方法を模索することとなった。

2. 仮説と目的

初年度2014年度の時点では、著者は、物理学としての基礎熱力学²に偏重すべきではないと考えていた。しかし、2015年度以降は、「工学系であっても、基礎熱力学への重視が有効に働く」という仮説を立てた。この仮説に基づき、“工学科”の熱力学の受講生への教育改善の効果を調べると、大多数の学生に対して有効に働くことがわかった。3節では試験の出題方針の改定による効果を、4節ではアンケートに基づく教育改善効果をそれぞれ述べる。

3. 試験の出題方針改定

「熱力学I」の中間試験において、2014年度の出題のほぼ半数は計算問題であったが、2015年度以降は計算問題を廃止し、全問題を公式の導出と定理の証明に改めた。その結果、同試験の平均点は51点(2014年度)から78点(2015年度)へと大幅に上昇した。同科目の不合格率は35%(2014年

度)から14%(2015年度)へと大幅に低下し、以降、10%(2016年度)、21%(2017年度)と推移している。熱力学第一法則に関する試験問題を例示する。

- 計算問題(2014年度): なめらかに作動するピストン・シリンダ系に封入された気体に、外界から120Jの熱を加えると同時に、外界から50Jの仕事を与えた。気体の内部エネルギーの変化量を求めよ。
- 導出問題(2015年度): 微小変化に対する熱力学第一法則から出発して、内部エネルギーの有限の変化量を、熱と仕事を用いて表現する数式を導け。

前者(計算)よりも後者(導出)の方が、圧倒的に難易度が高い装いをみせるが、真逆の結果が得られた。

2014年度に「他科目に比べて記号が多すぎて、どの公式を使えばよいかわからない」という声が寄せられた。「記号が多い困難は、どの物理でも同じだろう」と思ったが、この声は率直ながら的を得ていることに気づいた。熱力学は、諸量のほぼ全て(圧力や温度などの状態量、仕事と熱、比熱など)が序盤で怒涛のように登場し、その波が一段落したところで、エントロピーや自由エネルギーなどの発展的な状態量が緩やかに現れだす。これが、ページをめくるにつれて諸記号が現れる他の力学との顕著な差異であり、初学者の混乱を招くことは当然と考える。とくに工業熱力学では、多数の計算問題演習に重点がおかれ、諸記号と諸概念を整理できていない状態で、公式の使い方に習熟せねばならない場面が多いように見受けられる。電卓を叩いてオーダを実感させる作業も、技術者育成上は重要といえるが、諸記号の嵐に埋もれている中で、計算問題が容易に解けるだろうか、解けたとしても結果の意味を解釈できるだろうか。上記試験結果から、とくに序盤では、公式の導出を中心とした諸概念の定着と諸量の整理に焦点を絞ることが有効と示唆される。これを受けて、2015年度以降、工業熱力学に相当する「熱工学」との緊密な連携を図り、基礎概念理解を熱力学で、計算問題を「熱工学」で行うように住み分けている。

以上の改善の結果、「概念の理解だけに努めれば、計算問題も自然と解けるようになり、特段の対策は不要と気づけた」といった声が聞こえ始めた。

4. アンケートにみる学生の反応

“工学科”の学生は、批判的な意見も包み隠さずに述べることから、意見のほとんどは本音とみなしている。そこで、可能な限り学生の生の声を引き出す目的で、定期的にアンケートを実施している。

代表例として、2015年度に実施したアンケートを示す。「熱力学I」の実施後、「熱力学II」の開講時に、manaba(筑波大学の学習管理システム)を利用して、下記設問のアンケートを実施した。受講生87名のうち、回答者は83名であったが、「公開に不同意」と回答した6名を除外した計77名の回答を用いる。紙数の都合上、設問と回答の文章を一部改変したが、原文と本質的な差異はない。

1. 熱力学は、好き、嫌い、得意、苦手のいずれか。理由も述べよ。
2. 「熱力学I」を受けて、大学と高校の熱力学の違い(あるいは類似点)として何を感じたか。
3. 「熱力学I」の内容において、易しい(あるいは得意、好き)と感じた箇所、難しい(あるいは苦手、嫌い)と感じた箇所を具体的に挙げよ。

次項からは、各設問の意図と代表的な回答を挙げ、傾向を分析する。なぜそのような回答が得られたのかを考察し、教育改善の動機と経緯を述べる。

4.1 好き/嫌いと得意/苦手(問1)

「熱力学I」を学び終えた時点での“得意”と“苦手”の意識の把握は「熱力学II」の講義設計の上で欠かせないし、学習意欲は“好き”か“嫌い”かに依存すると考えて問1を設けた。多数の学生が、“好き”もしくは“得意”と回答することを期待したが、“得意”と答える声は少数であった。表1に、“好き”、“嫌い”、“得意”、“苦手”、“判断不能”の5通りの人数と割合[%]を示す。“判断不能”は、“好きだが苦手”のような、いずれにも該当しない回答を意味する。“好き”が最多数の約6割を占める一方で、“得意”は“嫌い”と並んで最少数である。著者の取り組みは、熱力学を“好き”にさせることには成功したといえるが、“得意”にさせることには至らなかった。一方、“嫌い”は最少数、“苦手”が2割強で次点

表 1: 問 1 の回答.

	好き	嫌い	得意	苦手	判断不能	計
人数	45	4	4	18	6	77
割合	59	5	5	23	8	100

を占める.

次項から具体的な回答を挙げながら考察する. 類似回答は集約し, 代表例を列挙する (以降も同様).

4.1.1 “苦手”および“嫌い”

- エントロピーが理解できていないから.
- 目に見えなく, 現象のイメージもしづらい概念が多く, 捉えどころもないから.
- 式の意味をきちんと理解するという点では, 他科目と評価方針が全く異なっているから.
- 問題を解いている最中に, 何をすればよいのかすらわからなくなることが多いから.
- 熱という概念自体がわかりにくく, 質点力学や材料力学に比べて抽象的すぎるから.
- 定義が厳密過ぎて面倒に感じるから.

A から C が “苦手” で, D から F が “嫌い” であるが, 理由が類していた. 成績不振者が “苦手” あるいは “嫌い” と回答する傾向にあったが, 成績優秀者でも “苦手” と回答する者が一定数存在した.

4.1.2 “得意”および“好き”

- エネルギー問題を考える上で, 熱力学は重要だから, 習得は必須なので勉強した結果得意になった.
- 法則や概念に全て関連性があるとわかると, 途端に, 色んなことがすんなりと理解できたから.
- 理解に苦しむ部分が特にないから.
- 評価方針, 試験問題, 講義資料において, 理解が重視されており, 暗記事項が少なく, 定義の意味と式変形さえ理解すれば, 問題がスムーズに解けるから.
- 熱力学第一法則からさまざまな公式が導かれることが面白く, 複数の式を組み合わせてゆくので, パズル感覚でできるから.
- 私は形式的な計算問題よりも, 概念的なことを筋道を立てて理解してゆくことが好きであり, 熱力学ではそのような場面が多いから.

G. 日常生活に関連づけてイメージしやすいから.

H. 自身の頭の中で概念をイメージし, 結び付け, 辻褃をあわせるのが熱力学だと思う. 個々人でイメージが異なる自由さに魅力を感じると同時に, そのような論理を組み立てる作業が楽しいから.

I. エンジンや燃焼に興味があるから.

J. 他科目よりも実践的と感じるから. 例えばサイクルは, エネルギー効率を考える上で不可欠であり, 現実世界でも応用されていることがわかるから.

K. 私は土木建築系志望であり, 「熱力学 I」では, 熱力学は気体のみを扱う学問であり, 自身に熱力学は不要と感じていた. しかし, 「熱力学 II」で, 固体, 液体, 気体の垣根を超えた一般論を構築してゆくという話を聞き, 詳細な実用例をも示してくれたから.

回答 A から C が “得意”, D から K が “好き” である. “好き” の理由は 3 つに大別される. (i) 講義と評価の方針 (回答 D), (ii) 熱力学の内容 (回答 E から H), (iii) 工学応用の観点 (回答 I から K). (iii) について, 土木建築といった非機械志向の学生に, いかに熱力学の必要性和重要性を伝えるかは, 著者が苦心した点であり, その経緯を次項で詳述する.

4.2 “工学科”と一般関係式の対応

“工学科”のように, 受講生の概ね半数が非機械志向である総合工学科においては, 前述のように, 「熱力学 = 気体 = 建築に不要」と勘違いさせることは避けねばならない. そこで著者は, Maxwell の関係式を含む一般関係式 (Mayer の関係式など) に着目した. この修得のポイントは, 既習の理想気体の仮定の排除にあり, 固体と液体をも包含する数式群の整備が重要な目的である. Maxwell の関係式は, “わかりにくい” エントロピーを消去し, “わかりやすい” 圧力や温度に置き換えるための道具と説明している. さまざまな一般関係式において, 簡単な一例として, 理想気体への帰結を体感させている. 「熱力学は気体の学問」と捉えるのではなく, 「固体の熱力学こそ諸君がこれから開拓すべき領域」と述べることで, 土木建築志向の学生から良い反響が得られた.

まず一般的な数式群を導き整備しておき, 必要に迫られた際に, 自身 (機械, 電気, 建築など) が着

目する系(気体, 液体, 固体)の状態方程式を代入する. 多少の強引さは否めないが, このような捉え方そして学び方が, “工学科”における熱力学教育の1つの理想像と考える. 一般関係式は高度に抽象的で, 熱力学の中で最難関な単元の1つといえる. 初年度は, 多くの学生が偏微分のパズルのように勘違いしていたが, “工学科”の特徴を最大限に活かして, 学生の習熟度と満足度が高いものに改善できた. 事実, 「熱力学II」(内容の約半分が一般関係式)の不合格率は, 2014年度は20%と低くなかったが, その後は, 9%(2015年度), 3%(2016年度), 10%(2017年度)と推移しており, 2015年度以降は高い習熟度を得つつある.

4.3 高校と大学の違い(問2)

「熱力学I」の初回で, 「扱う対象(理想気体や等温過程)は高校と大きく変わらないが, 数学的道具(微積分)が異なる」と強調している. 問2でこの点を指摘する回答が多いと予想したが, 他の点を述べる回答も多かった. 代表的な回答を列挙する.

- A. 大学受験で, 計算問題の符号のミスでつまづいてから, 熱力学が嫌いになった.
- B. 仕事の符号の定義が高校とは違う.
- C. 微分積分を使う点が最大の違いだ. 微小量のような新たな概念が登場し, 本質に迫っていると感じた.
- D. 有限量と微小量の区別が難しい.
- E. 圧力や仕事は高校でも登場したが, これを状態量か非状態量かを区別する点が高校とは異なる.
- F. 高校は暗記が中心で, ごまかされていた感じがする. しかし, 大学は根本からの理解が必要と思った. 慣れるまでに時間を要したが, 1つを覚えてしまえば芋づる式に他の公式も導ける.
- G. 公式に数字をひたすら代入する高校に対して, 大学では公式を突き詰めた上で論理的に解く印象だ. その結果, 高校時代の疑問が解消されつつある.
- H. 高校と大学で扱う対象(理想気体など)は似ているが, 大学ではさまざまな観点や手法を駆使する点が面白い. エントロピーの登場など飽きることがなかった.

回答AとBは符号の定義を言及している. 例年, 高校の熱力学に対して「仕事と熱の符号の定義が苦手だった」という声が多い. 熱力学第一法則は, 高校物理や理学系では,² “入る”熱と “される”仕事を用いる一方で, 工業熱力学では,¹ “する”仕事を用いる傾向にある. 著者は後者の定義を採用している. なぜなら, 食事をしてから働きに行くように, 日常的感覚では, ふつう, 熱はもらうもので, 仕事はするものだからである. この観点は, “工学科”の学生が, 熱力学を応用する立場にあることから重要といえる.

回答CからEは, 微小量か否か, 状態量か否かの区別に関する. 熱力学の等式において, 両辺が有限量か微小量かを確かめることは, 初学者にとって重要極まりないが, 受講生はここに苦手意識を感じやすい. 事実, 「熱力学I」の時点では, 左辺が有限で右辺が微小という誤りを答案に書く傾向にある.

回答FからHのように, “学び方”への指摘が最多数を占めた. 高校は公式の利用法や問題の解法を, 大学は公式の導出や概念の理解をそれぞれ重視するという声であった.

4.4 易しい点と難しい点(問3)

回答は多岐にわかれたが, 代表例を列挙する.

- A. 易しい点はなかった. 質点力学や材料力学に比べて, 現象がイメージしにくいから.
- B. 他科目よりも易しい. 覚えるべき定義が少なく, そこから多数の公式が誘導できて, その誘導の論理も明確だから. 事実, 試験中に曖昧になっても, 公式と定義から再確認し, 確信を持って解答できた.
- C. 新出の用語や記号について, 定義, 意味, 導出のみならず, 毎回次元を確認していただいたので, 他どの記号と同種なのかを理解することに役立った.
- D. サイクルや熱効率のように, 実用性のある工学的な概念の理解には苦労しなかった.
- E. 式変形は容易だったので, 数学的には易しい.
- F. 熱力学第一法則から出発して, さまざまな公式を導く問題は易しかった.

- G. 第一法則を出発点に話が展開されてゆき、各事項が密接に関わるため、1つがわからなくなると、他の全てもわからなくなってしまう。
- H. Carnot の定理が難しい。Thomson の原理や Clausius の原理が理解できなかった。
- I. エントロピーの物理的意味がわからない。
- J. 計算問題が苦手。記号だけで変形していたところに、公式に数値の代入を求められると、どこにどのように代入すればよいのかの判断に苦戦した。
- K. 他の科目に比べて記号が多すぎて、どの公式を使えばよいか、はじめの一手がわからないことが多い。

A から F が易しい点、G から K が難しい点に分類される。「熱力学 I」で計算問題を講義中の演習として課したが、著者の中間試験からは排除した。想定通り、導出問題は易しく(回答 E, F)、計算問題は困難(回答 K)という声が寄せられた。記号が多い困難は排除したが(3節)、それでもなお言及する声(回答 L)があった。次項で、多数を占めた第一法則に関連する声(回答 F, G)について述べる。

4.5 道具としての熱力学第一法則

2014 年度に最も多く聞いた声は「熱力学は始めの一手が思い浮かばない」に尽きた。振り返ると、質点や剛体の力学では、迷わずにまずは運動方程式(Newton の運動の第二法則)を立てればよい。運動方程式が解けないことはあっても、はじめの一手すら思い浮かばないことは稀だろう。熱力学の“道具”は、(内部)エネルギーの保存を意味する熱力学第一法則に他ならないといえるが、さまざまな要因が、これに独力で気づくことを妨げていると見受けられる。「1年次の力学では、Newton の第一、第二、第三法則は、それぞれ別々の法則という印象があった。そのため、2年次の熱力学でも、熱力学の第一法則と第二法則は別の法則という先入観を抱いたが、第二法則の章で、第一法則を多用することに気づいて驚いた」という声が寄せられた。

そこで、「第一法則が道具で、これさえ立てれば何とかなる。立てないならば、どこからともなくエネルギーが生成されるという不自然な物理を許してしまう」と保存則の観点を強調した。その後、

第一法則から出発して、さまざまな公式が導かれることを示した。その結果「熱力学は公式が多いと感じていたが、第一法則と少しの定義式さえ知っておけば、全ての公式が容易に導けると気づけた」といった声が多数の学生から寄せられた。

5. おわりに

筑波大学理工学群工学システム学類(“工学科”)で著者が担当している熱力学において、「計算問題を解かせて定量的理解を促すよりも、基礎概念の定性的理解に注力する方が効果的」という仮説に基づき、教育改善の効果を調べた。講義と試験問題出題の方針の改定、および、学生の声を包括的に集めるアンケート調査から、以下の結果が得られた。(i) 工学系であっても、公式の導出や定理の証明といった物理学的基礎の重視が、学生の理解促進に効果的と判明した。(ii) 合格率の上昇と熱力学に対する好感度が高いことから、習熟度と学習意欲の向上が伺えた。

“工学科”に限らず、他の学類からの受講者が年々増加の傾向にある。現在は、カリキュラム再編の時期にあり、数年後には受講者が倍増すると予想されるが、受講者全員を丁寧に観察しながらも、厳格な成績評価を行うという教育改善の基本方針は揺るがないと考える。

本研究の一部は、“学生の声を基にした熱力学の教育改善に関する研究(筑波大学システム情報系研究倫理委員会の承認下)”の一貫として実施した。

参考文献

- [1] 日本機械学会(編)『熱力学』(2002)など。
- [2] 三宅哲『熱力学』裳華房(1989)など。

連絡先 E-mail : kanagawa@kz.tsukuba.ac.jp